

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 18220051301749

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

超精密测量光路中调焦位移
共轴检测技术的研究

Study on Coaxial Displacement Detection Technology of Focus

Adjustment in Ultra-precise Optical Measurement

杨晓东

指导教师姓名: 张建寰 副教授

专 业 名 称: 测试计量技术及仪器

论文提交日期: 2008 年 5 月

论文答辩时间: 2008 年 5 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____

2008 年 5 月

超精密测量光路中调焦位移共轴检测技术的研究

杨晓东

指导教师: 张建寰 副教授

厦门大学

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版,有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅,有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索,有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密 (), 在 年解密后适用本授权书。
2. 不保密 ()

(请在以上相应括号内打“√”)

作者签名: 日期: 年 月 日

导师签名: 日期: 年 月 日

摘 要

本课题是福建省科技计划重点项目“柔性电路 FPC 非电量参数在线质量控制技术研究”中的一项关键技术——实现超精密光学测量系统中调焦位移的共轴检测,解决该系统中原理性误差问题,并最终提高光学测量系统的测量精度。

在应用各种光学原理实现对超精加工表面的几何量测量中,精加工表面面形及微观形貌是由位移传感器记录光学测头的离焦量而得到的。电容式位移传感器具有很多优点,是记录调焦位移的关键部件。结合实现光学测量系统测头的小型化及减小边缘效应影响等要求,可用变极距式平板电容位移传感器实现光学测量系统调焦位移的共轴检测。本文突破了普通平板式电容位移传感器的结构限制,设计了一种新型的中间通光、环状电极、带双等电位保护环电容式位移传感器,使测量光路的测量光轴从极板的对称中心穿过,传感器对称轴与光路的光轴重合,从而满足阿贝测量原则;改变传统机械加工工艺,采用微机电系统(MEMS)工艺加工双等位环电极极板,可以使极板做得很薄,约为几微米;等位环与电极极板之间的间隙很薄,约为 $10\mu\text{m}$,有效减小了边缘效应附加电容的影响,从而提高了测量的线性度和测量精度;设计了改进型的电容运算放大器检测电路。最后,通过数据采集卡将测量信号采集到计算机,由计算机将数据处理、显示输出,实现了智能化。

课题主要的研究工作内容有:

1. 对平板式电容传感器的边缘效应及其对输出特性的非线性影响进行定性分析;
2. 根据课题设计要求,应用 AutoCAD 软件绘出中间有通光孔的双等位环电极极板的结构;
3. 设计电极极板加工的 MEMS 工艺流程并加工电极极板;
4. 在电路仿真的基础上,设计电容式传感器检测电路,进行位移测量实验;
5. 完成了电容式位移传感器的初步标定。

在完成了试验仿真的基础上,在实验台上进行了动态试验。对电容式传感器的标定实验表明,非线性误差小于 1%,实现了预期的设计目标。

关键词: 超精密测量; 电容式位移传感器; 双等位环; MEMS 工艺

ABSTRACT

This research is a crucial technique in the provincial technical project named “Flexible Circuit FPC Non-electrical Quantity Parameter Online Quality Control Technology”. It can accomplish the coaxial detection of focus adjustment displacement in the ultra-precise optical measurement system, which solves the problem of theoretical error in the system and increases the measurement accuracy of the optical measuring system.

In the process of the geometrical dimensional measurement to the Ultra-precise finish surface via the theory of confocal microscopy measurement, which is recorded by the displacement sensor. Capacitive displacement sensor has lots of advantages and it is the key part which applied to detect the focusing displacement. According to the request of miniaturization and minimizing the influence of edge effect in optical measurement system, plate capacitive displacement sensor succeeds in coaxial detection of focus displacement. The thesis has put forward a new-style capacitive sensor. This orbicular capacitive sensor with a middle-hole and double equipotential rings improves the structural constraint of the ordinary plate one. This new-style structure makes the light path of plain shaft pass through the centre hole of the orbicular polar plate, and then the measurement of the directional of displacement is coincident with plain shaft, which is in accordance with the Abbe Rule. Breaking through the traditional mechanical processing technique, the design applies MEMS technique to process the orbicular polar plate with double equipotential rings, which can make the thickness of the plate very thin (about 1mm), and the gap between the equipotential rings and the polar plate (about 10 μ m). This technique effectively decreases the edge effect influence of stray capacitance and increases the measurement accuracy of linearity. What's more, it has devised an improved measure of operational amplifier to detect the circuit. In conclusion, the data recording chip collects the signal voltage to the computer and output the information through computer, which intelligentizes the whole system.

The research includes the following five subjects:

1.The qualitative analysis of the edge effect in flat capacitive displacement transducer and the nonlinear influence in output characteristics;

2.In accordance with the request of research, design the structure of orbicular polar plate with double equipotential rings via the AutoCAD software;

3.Confirm the procedure of MEMS technique and complete the polar plate;

4.On the basis of the simulation testing, design the test circuit of capacitive displacement sensor and experiment the displacement measurement;

5.Calibrating testing of capacitive displacement sensor;

On the basis of the successful simulation testing and dynamic testing on the experiment table, it concludes that the capacitive sensor's resolving capability outgoes $0.02\mu\text{m}$ and the nonlinear error is less than 1%, which is in correspondence with the design objective.

Key Words: Ultra-precise Measurement; Capacitive Displacement Sensor;
Double Equipotential Rings; MEMS Technique.

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 本课题的研究目的和意义	2
1.3 微位移测量技术的研究现状	3
1.3.1 常用的微位移测量方法 ^[2]	3
1.3.2 电容式传感器的研究现状	5
1.4 本课题的主要研究内容和研究方案	6
1.5 本章小结	7
第二章 光学测量系统分析	8
2.1 引言	8
2.2 测量光路原理	9
2.3 测量光路中的平板式电容位移传感器	10
2.3.1 测量光路中阿贝误差	10
2.3.2 边缘效应	12
2.3.3 传感器电极极板加工	13
2.4 本章小结	14
第三章 电容式传感器基本原理	15
3.1 电容式传感器概述	15
3.2 电容式传感器工作原理	16
3.2.1 电容式传感器的构成及各元件的作用 ^[10]	16
3.2.2 电容式传感器的类型	17
3.3 双等位环电容式位移传感器结构分析	22
3.4 应用中存在的问题及改进措施 ^[12]	24
3.4.1 等效电路	24
3.4.2 边缘效应	24
3.4.3 静电引力	28
3.4.4 寄生电容	29
3.4.5 温度影响	31
3.5 使用电容式传感器应注意的几个问题	32
3.5.1 工作点的选择	32
3.5.2 标定	32
3.5.3 绝缘、接地与屏蔽	33
3.6 本章小结	33
第四章 平板式电容传感器电极 MEMS 工艺研究	34
4.1 微机电系统 (MEMS) 概述 ^[14]	34

4.2 微机电系统 (MEMS) 工艺简介 ^[16]	35
4.2.1 清洗	35
4.2.2 氧化	38
4.2.3 光刻	39
4.2.4 腐蚀	46
4.2.5 沉积	49
4.3 平板式电容传感器电极的制作流程	52
4.4 制作过程中的问题及其解决方法	60
4.5 本章小结	63
第五章 电容式传感器检测电路的研究与设计	64
5.1 检测电路的方案选择	64
5.1.1 引言	64
5.1.2 电容检测电路的分类 ^[24]	64
5.2 检测电路的设计	68
5.2.1 改进型的运算放大器检测法	69
5.2.2 电容检测电路的仿真	78
5.3 本章小结	81
第六章 实验结果及分析	82
6.1 实验系统设计及装置	82
6.1.1 实验光路系统	82
6.1.2 读出信号处理 (信号放大电路)	83
6.1.3 数据采集模块	83
6.1.4 LabVIEW 计算机程序设计	84
6.2 实验结果及分析	85
6.2.1 实验测试	85
6.2.2 实验数据分析	88
6.2.3 实验误差分析	90
6.3 本章小结	91
结 论	92
参考文献	94
致 谢	98
攻读硕士学位期间发表的论文	99

CONTENTS

CHAPTER 1 INTRODUCTION	1
1.1 FOREWORD.....	1
1.2 PURPOSE AND SIGNIFICATION.....	2
1.3 RESEARCH STATUS OF MICRO DISPLACEMENT MEASUREMENT.....	3
1.3.1 Usual Method of Micro Displacement Measurement ^[2]	3
1.3.2 Research Status of Capacitive Sensor	5
1.4 MAIN WORK AND RESEARCH PROJECT	6
1.5 CONCLUSION	7
CHAPTER 2 ANALYSIS OF OPTICS MEASUREMENT.....	8
2.1 FOREWORD.....	8
2.2 THEORY OF CONFOCAL MICROSCOPY MEASUREMENT	9
2.3 CAPACITIVE DISPLACEMENT SENSOR IN THE SYSTEM.....	10
2.4 CONCLUSION	14
CHAPTER 3 THEORETICAL ANALYSIS OF CAPACITIVE SENSOR	
.....	15
3.1 INTRODUCTION OF CAPACITIVE SENSOR	15
3.2 THEORY OF CAPACITIVE SENSOR.....	16
3.2.1 Structure of Capacitive Sensor ^[10]	16
3.2.2 Type of Capacitive Sensor	17
3.3 ANALYSIS OF CAPACITIVE SENSOR'S STRUCTURE.....	22
3.4 PROBLEMS AND IMPROVED MEASURE ^[12]	24
3.4.1 Equivalent Circuit	24
3.4.2 Edge Effect.....	24
3.4.3 Electrostatic Attraction.....	28
3.4.4 Stray Capacitance.....	29
3.4.5 Effect of Temperature	31
3.5 SEVERAL PROBLEMS IN USE	32
3.5.1 Choice of Action Spot.....	32
3.5.2 Standardization	32
3.5.3 Insulation、Ground And Screen.....	33
3.6 CONCLUSION CONCLUSION	33
CHAPTER 4 STUDY OF MAKE ELECTRODE ON MEMS	
TECHNIQUE.....	34

4.1 SUMMARIZE OF MEMS ^[14]	34
4.2 INTRODUCTION OF MEMS TECHNIQUE ^[16]	35
4.2.1 Clean	35
4.2.2 Oxidation.....	38
4.2.3 Photolithography.....	39
4.2.4 Etch	46
4.2.5 Sputter	49
4.3 PROCESS OF MAKE ELECTRODE	52
4.4 PROBLEMS AND IMPROVED MEASURE	60
4.5 CONCLUSION	63
 CHAPTER 5 STUDY AND DESIGN OF TEST CIRCUIT.....	 64
5.1 CHOICE OF TEST CIRCUIT	64
5.1.1 Foreword	64
5.1.2 Type of Test Circuit ^[24]	64
5.2 DESIGN OF TEST CIRCUIT	68
5.2.1 Improved Measure of Operational Amplifier	69
5.2.2 Simulation of Test Circuit	78
5.3 CONCLUSION	81
 CHAPTER 6 TEST AND ANALYSIS OF CAPACITIVE SENSOR.....	 82
6.1 DESIGN OF TEST SYSTEM	82
6.1.1 Optical System.....	82
6.1.2 Processing of Reading Signal	83
6.1.3 Data Acquisition.....	83
6.1.4 LabVIEW Programme	84
6.2 RESULTS AND ANALYSIS	85
6.2.1 Test.....	85
6.2.2 Data Analysis	88
6.2.3 Error Analysis	90
6.3 CONCLUSION	91
 CONCLUSION	 92
 REFERENCES	 94
 THANKS	 98
 PUBLICATION	 99

第一章 绪论

1.1 引言

在光学非接触超精密测量应用中，如基于差动像散技术的超精密测量调焦光路等，实现对几何量的超精密测量的关键部位是记录调焦位移的传感器，即被测表面的形貌是由调焦位移数据直接给出的。^[1]因此，记录调焦位移大小的传感器的精度将直接影响测量结果的精确度，如图 1-1 所示的调焦测量光路。

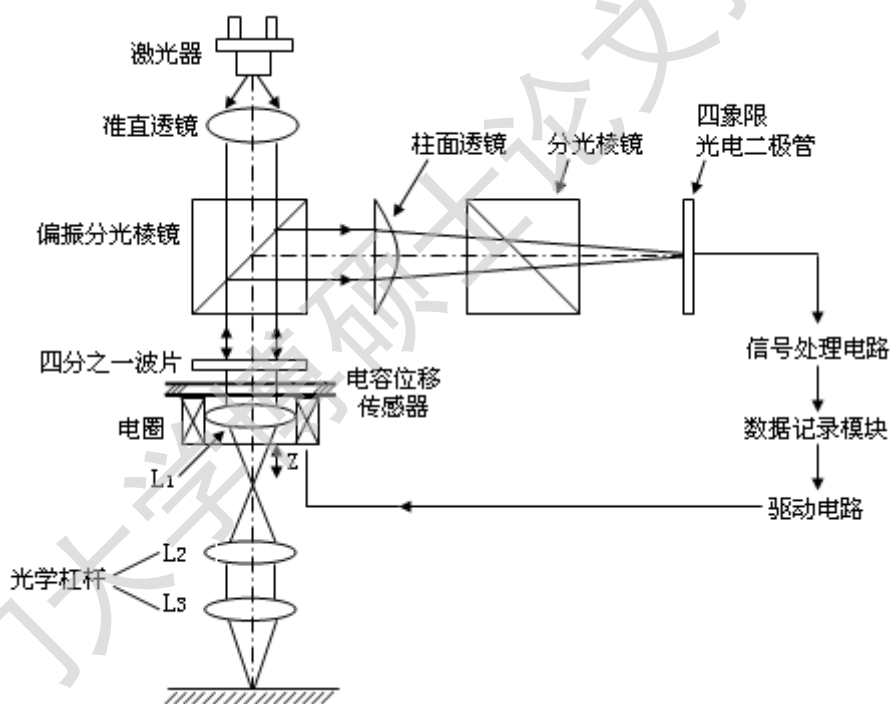


图 1-1 调焦测量光路原理图

用于记录光路中调焦位移的传感器有许多种，如压电式传感器、磁电式传感器、电阻应变式传感器、电容式传感器等。在这些可实现调焦位移的传感器中，有些传感器因为体积较大，不适合安装在光路中；有些传感器因为测量精度低，难以满足对被测表面实现超精密测量的要求；有些传感器会使调焦驱动器件的频率响应特性变差；还有些传感器动态响应比较差等。

电容式位移传感器原理简单，作为可实现超精密测量中调焦位移记录的传感

器，其灵敏度、动态特性、测量精度、信号处理速度等方面具有其它类型传感器所难以比拟的优势，特别是可以实现非接触测量和实时在线测量。因此，常被应用于超精密的光学测量实践中，记录光路调焦量的大小，并给出被测对象的微观形貌数据。

1.2 本课题的研究目的和意义

本课题是福建省科技计划重点项目“柔性电路 FPC 非电量参数在线质量控制技术研究”中的一项关键技术——实现超精密光学测量系统中调焦位移的共轴检测，解决该系统中原理性误差问题，并最终提高光学测量系统的测量精度。

普通的电容式传感器主要有三种类型，变极距型、变面积型和变介质型，目前在实际应用中，变极距型和变面积型应用的较多。其中变极距型的分辨力最高，可以达到 $0.01\mu\text{m}$ ，因此广泛应用于微位移测量中。但电容式传感器的测量精度要达到亚纳米级甚至纳米级，这就需要进行特殊的设计、制造和信号处理电路。

首先，常用的平板式电容传感器，其电极极板外边缘处存在发散电场，造成电场畸变，使其线性变差，需要用等电位保护环来改善。等电位保护环可以改善电容传感器电极外边缘处的电场畸变，有效减小边缘效应的影响甚至可以忽略不计。但是要达到上述的效果，等电位保护环与有效测量电极极板之间的间隙要做的尽可能小，以保证电极边缘处电场不发生扭曲。这就带来了另一个困难，即等电位保护环与有效测量电极极板之间的间隙在普通机械加工及安装条件下，不可能实现几个微米量级，也难以达到绝缘电阻的要求。因此，如果采用传统加工制作方法这种电场畸变的影响仍然存在；

其次，信号处理电路要求使等电位保护环与有效测量电极极板的供电电压保持严格的相等，同时要保证低的噪声、避免干扰信号引入等；

第三，这种普通圆形极板的平板式电容传感器在记录光路的调焦位移信号时，传感器的测量轴不能实现与调焦光路的光轴同轴，这样在测量时不符合阿贝原则，从而引入测量误差。这种误差虽然很小，但对于纳米级测量系统来讲，是提高测量精度的一大障碍。

因此，本课题的研究目的就是要研究一种新型结构的、符合阿贝测量原则的电容式位移传感器，并研究其应用 MEMS 技术进行加工的工艺，使等电位保护环

与电极极板间隙大小、极板厚度达到设计要求,以及研究电容位移信号处理电路,达到提高其测量精度的目的。

该课题的研究成功,可以使应用调焦光路实现超精密测量的光学系统的位移记录精度达到纳米级,从而实现高精度测量的目的。而这种测量系统在精密及超精密工程、微机电系统加工质量、半导体器件表面加工质量、甚至在光学存储相关设备等领域具有广泛的应用。为在该领域占据一席之地,提升相关技术的竞赛力,奠定坚实基础。

1.3 微位移测量技术的研究现状

1.3.1 常用的微位移测量方法^[2]

对不同的被测对象进行测量时,采用的测量技术也不尽相同,大致可分为:在线测量和离线测量,接触测量和非接触测量。常用的微位移测量技术主要有四种:机械式测量技术、显微镜测量技术、光学测量技术和电学测量技术。^[3]

1. 机械式测量技术,大部分是接触式测量,测量时将被测物体与标准测量器具进行比较,得出位移量的变化值。常用的测量器具包括千分尺、游标卡尺和螺旋测微仪等。

2. 显微镜测量技术

(1)扫描隧道显微镜,其原理是应用量子理论中的隧道效应。

(2)原子力显微镜,其原理是利用物质表面间的原子间力效应,可用于非导体,开辟了微观尺寸测量的新的研究领域。

(3)光子扫描隧道显微镜,是用光探针探测物体表面被内全反射光所激励的瞬态场,其分辨率远小于入射光的半波长,突破了光学显微镜半波长极限的限制。

(4)扫描近场光学显微镜,这是另一种具有亚波长分辨率的光学显微镜,它使用一个孔阑限制的光纤探针去探测物体表面的辐射,辐射的强度是物体表面光学性质的量度。虽然其量程仍然有限,但已广泛应用于各个研究领域和许多工业行业的表面分析、微观现象的研究中。

(5)扫描电子显微镜,在实现观测物体表面微观形态的同时,也能达到测量精度为几个埃的水平。扫描电子显微镜的扫描范围较大,具有几纳米左右的分辨率

和几十万倍的放大倍数，易于进行选区扫描，且有很长的工作距离和景深。

3. 光学测量技术

(1) X 射线干涉术，X 射线的波长为 0.4 纳米左右，作为基准它的波长很短，提高了测长的分辨力，利用 X 射线的超短波长干涉测量技术可以实现 0.01 纳米分辨率的位移测量，测量范围可达 200 微米。

(2) 激光频率法，其原理是基于激光的光谱特性，激光输出的光谱取决于谐振频率和谐振腔长度。这就表明，当激光器中一个反射镜位置固定时，可以根据激光频率与谐振腔长度的关系确定另一个可动发射镜的位置。通过测量激光频率就可以测量测出微小位移，其准确度在纳米的量级，这种方法对于微米甚至纳米范围的微位移测量比较有利。

(3) 全息光栅，是利用干涉方法制作的光栅。与计量光栅相比全息光栅具有很高的空间频率，正是利用其高的空间分辨力作为长度测量基准来实现位移的精密测量。光栅技术对环境的要求相对较低，可以满足纳米精度的使用要求，但不能实现非接触测量。

(4) 光学干涉仪，对于纳米级位移测量而言，激光干涉技术仍然是主要的测量方法之一。光波干涉分为双光束光波干涉和多光束光波干涉。通常是利用干涉条纹图的测量方法进行测量纳米级测量，其应用具有很大的局限性。

4. 电学测量技术，典型的有电感式和电容式测微仪。

(1) 电感式测微仪，一种接触式高精度微位移测量仪器，它由电感测头和测量仪器组成，广泛应用于精密机械制造业，如零件尺寸、形状精度检测等。

(2) 电容式测微仪，电容式传感器是近年来发展很快的用以进行微位移测量的方法之一。

机械式测量技术测量操作简单、使用方便、测量范围大，但精度低、不易实现动态测量和无接触测量，难与微机接口。显微镜测量技术和光学测量技术分辨率高，但系统相对复杂，对环境和操作水平要求高，主要应用于实验室的检测，不能应用于在线检测。电学测量技术结构简单、量程较大、非基础测量、抗干扰能力强，可用于现场的生产检测。

1.3.2 电容式传感器的研究现状

在测量技术中,广泛地采用电学测量技术。电学测量技术具有下列主要优点:测量的准确度和灵敏度高,测量范围广;测量反应速度快,具有比较宽的频率范围;电信号易于传输和处理;能自动连续地进行测量,便于自动记录;采用微处理器制成的智能化仪器可与微型计算机一起组成测量系统;可进行远距离测量,从而能实现集中控制和远程控制。

在不少场合,还要求能对被测物体进行非接触式测量,这是因为:传感器探头与被测物体表面接触,一方面会磨损传感器探头,另一方面还有可能会损害被测物体表面。而且在有些场合下,根本无法使用接触的方法来测量。因此,在非电量检测领域中,非接触式测量方法及仪器的研究一直是检测技术发展的一个重要方面。有多种传感器如电感式传感器、光电式传感器都能实现非接触式测量。电容式传感器的主要优点有:^[4](1)体积小,结构简单;(2)响应时间短,适合于在线测量和动态测量;(3)灵敏度高,测量精度高;(4)探头结构简单,可以适用于恶劣条件等等。

电容传感器虽然存在很多不足,比如:寄生电容影响大,不仅降低了传感器的灵敏度和精度,而且会使仪器工作不稳定,变极距型电容传感器输出成非线性,即使其他类型的电容传感器由于边缘效应的存在,也会出现非线性等。但随着材料、工艺、电子技术尤其是集成技术的高速发展,成功地解决了电容传感器在使用中存在的问题,使之成为一种高灵敏度、高精度,在动态、低压及一些特殊测量方面大有前途的传感器。^[5]电容传感器的应用非常广泛,凡是可以转换为间距、面积和介电常数的量都可以用电容传感器来测量。

近年来,随着科学技术的发展,电容式传感器的缺点不断地被克服,应用也越来越广泛,尤其是出现了数字式智能化的电容式传感器,它是一种先进的数字式测量系统。将其测量部件技术与微处理器的计算功能合为一体,使得测量仪表至控制仪表成为全数字化系统。数字式智能化传感器的综合性能指标、实际测量准确度比传统的传感器提高了很多。^[6]

总之,随着传感器技术的发展,电容式传感器的形式将会多种多样,其形式应以非接触式为研究重点。其发展方向是通过广泛应用微机等高新电子技术来获得全面性能的进一步提高,同时还要向着小型化、智能化、多功能化的方向发展。

因此，电容式传感器在微位移测量中得到广泛研究和应用。

电容式传感器的相关研究，无论是过去还是现在、不管是在国内还是国外，都有许多的研究文献被报道，测量精度达到纳米级的电容位移传感器的报道也屡见不鲜。但对电容传感器研究的报导，大多数为应用传感器实现各种测量目的的相关应用研究，如测土壤湿度、材料壁厚、液面高度测量、压力测量等。而对研究如何优化电容传感器设计结构、从设计及加工的角度研究提高电容传感器测量精度的文献不多。近年来，随着科技发展的进一步需求，人们对电容传感器的研究更多地向微小型方向延伸，向如何提高电容传感器的测量精度、稳定性等方面扩展。例如，从电容传感器信号处理电路的角度如何提高位移测量精度的研究，从电容传感器信号处理的数字化角度的研究，从电容传感器电极板的结构角度开展的提高输入输出线性特性的研究，以及其它一些应用有限元分析软件进行的相关理论分析和仿真实验等。

对平板式电容位移传感器提高测量精度的研究，主要集中在从处理电路和结构优化的角度提高输出特性线性度这样的一些理论分析和实践。

这些理论分析和研究为传感器的结构设计、制造及后续处理电路研发指明了方向。尤其在信号处理电路方面，随着电子技术的飞速发展，目前已不存在难以克服的困难。国内外均可买到高精度的电容传感器驱动电路产品；对于电容极板的结构优化方面的研究进行得也比较深入，并基于这些分析设计了可以改善非线性、带有等电位保护环的极板结构；也有等电位保护环与极板间隙越小，电场畸变引起的非线性影响越小的结论。

1.4 本课题的主要研究内容和研究方案

1. 应用有限元分析的方法，对电容式位移传感器的两电极极板电场产生的边缘效应进行定性分析；研究等电位保护环与有效极板间隙大小对电场畸变以及对输出特性的非线性影响；

2. 应用 Auto CAD 设计软件，根据测量光路中要求的通光孔径的大小等因素，设计带通光孔的、有内、外两个等电位保护环的电容式位移传感器电极极板。选择合适的材料做电极基板，应用 MEMS 工艺，设计 MEMS 工艺流程，完成电容式位移传感器电极极板的加工。电极极板要求达到以下指标：内、外等电位保护环与

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库